

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 63, № 1 (2020), с. 89–98
Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 63, No 1 (2020), pp. 89–98

89

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98>

УДК 621.039.548:620.193

Влияние коррозии конструкционных материалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР

В. В. Кравченко¹⁾, С. Д. Цыганкова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье рассмотрены общее понятие коррозии в соответствии с ГОСТ 5272–68 «Коррозия металлов», классификация коррозионного процесса, стадии коррозии в виде функций энергии от пути протекания коррозионного процесса, основные показатели процесса коррозии. В соответствии с прогнозами Международного валютного фонда и Focus Economics произведена оценка количества средств, которые будут затрачены на борьбу с коррозией и ее последствиями в отдельных промышленно развитых странах. Динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации за 2016–2019 гг., показана в виде диаграммы. Обосновано использование циркония в качестве конструкционного материала для оболочки твэлов. Представлены значения сечений поглощения тепловых нейтронов для различных элементов, служащих в качестве конструкционных для активной зоны ядерного реактора. Приведены факторы, влияющие на выбор легирующих элементов и их процентное содержание в различных сплавах (Zr-2, Zr-4, ZIRLO™, M5®), которые являются специальной разработкой, способствующей снижению скорости коррозии. Рассмотрен состав и механические свойства сплавов Э110 и Э635, использованных в качестве материалов для оболочки твэлов в активной зоне реакторов ВВЭР-1200 на БелАЭС. Проанализировано поведение циркониевых сплавов Э110 и Э635 в активной зоне. Выделены основные факторы, которые существенно влияют на коррозионный процесс в реальных условиях эксплуатации циркониевых сплавов в качестве оболочек твэлов. Приведены существующие методы предварительной специальной обработки оболочек твэлов, хранящихся на воздухе в течение продолжительного промежутка времени до поступления их на сборку. Показана структура оксида на оболочках из сплавов Э110 и Э635, окисленных в автоклаве.

Ключевые слова: коррозионный процесс, оболочка твэлов, легирование циркония, коррозия циркониевых сплавов, сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия, «солнечная корона»

Для цитирования: Кравченко, В. В. Влияние коррозии конструкционных материалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР / В. В. Кравченко, С. Д. Цыганкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 89–98. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98>

Адрес для переписки

Кравченко Владимир Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes_bntu.@tut.by

Address for correspondence

Kravchenko Vladimir V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes_bntu.@tut.by

Effect of Corrosion of the Fuel Rod Construction Materials on the Radiation Safety of Nuclear Power Plants with PWR

V. V. Kravchenko¹⁾, S. D. Tsygankova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the general concept of corrosion in accordance with GOST 5272–68 “Metal Corrosion”, the classification of the corrosion process, the stages of corrosion as energy function of the flow path of the corrosion process, the main indicators of the corrosion process. According to the forecasts of the International Monetary Fund and Focus Economics, the amount of funds that will be spent on counteracting corrosion and its consequences in selected industrialized countries has been estimated. The growth of funds invested in the counteracting the effects of metal corrosion in the Russian Federation for 2016–2019 is presented in the form of a diagram. The substantiation of the use of zirconium as a structural material for the shell of fuel rods has been fulfilled. The values of the thermal neutron absorption cross sections for various elements serving as structural elements for the core of a nuclear reactor are presented. Factors influencing the choice of alloying elements and their percentage in various alloys (Zr-2, Zr-4, ZIRLO™, M5®), which are the special development that reduce the corrosion rate, are also considered. The composition and mechanical properties of E110 and E635 alloys, which were used as materials for the fuel rods shell in the core of WWER-1200 reactors at the Belarusian NPP, are considered as well. The behavior of zirconium alloys E110 and E635 in the core is analyzed. The main factors that make a significant contribution to the corrosion process in actual operating conditions of zirconium alloys as fuel rods shell have been identified. The existing methods of preliminary special processing of fuel rods shells stored in the air for a long time before their receipt for assembly are presented. The structure of the oxide on the shells of alloys E110 and E635 oxidized in an autoclave is demonstrated.

Keywords: corrosion process, fuel rod shell, zirconium alloying, corrosion of zirconium alloys, penetrating corrosion, spot corrosion, pitting corrosion, fretting corrosion, “solar corona”

For citation: Kravchenko V. V., Tsygankova S. D. (2020) Effect of Corrosion of the Fuel Rod Construction Materials on the Radiation Safety of Nuclear Power Plants with PWR. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 89–98. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98> (in Russian)

Введение

В современном мире в различных областях производства все чаще используют полимерные материалы в качестве конструкционных (пластические массы, резины и др.), но доминирующую позицию по-прежнему занимают металлы и их композиты [1].

Согласно [2], из всего многообразия металлов Периодической системы Менделеева только пять являются термодинамически устойчивыми: золото (Au), серебро (Ag), платина (Pt), иридий (Ir) и палладий (Pd). Они представлены в природе в неокисленном состоянии, а все остальные металлы и их сплавы при взаимодействии со средой (жидкость, газ) подвергаются разрушению, которое визуально проявляется на поверхности металла в виде ржавчины и в дальнейшем приводит к преждевременному выводу оборудования из эксплуатации.

Коррозия металла является одной из важнейших проблем производства, так как наносит колоссальный ущерб экономике любой промышленно развитой страны. В соответствии с последними данными Международной ассоциации инженеров-коррозионистов (NACE), средние затраты на решение проблемы коррозии ежегодно составляют 4–6 % ВВП. По прогнозным данным Международного валютного фонда и Focus Economics [3], в 2019 г. на борьбу с коррозией и ее последствиями будет затрачено: в США – примерно 860,249 млрд дол., во Франции – 117,363 млрд дол., в Японии – 209,249 млрд дол., а в Российской Федерации – 70,171 млрд дол.

На рис. 1 представлена динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации за 2016–2019 гг.

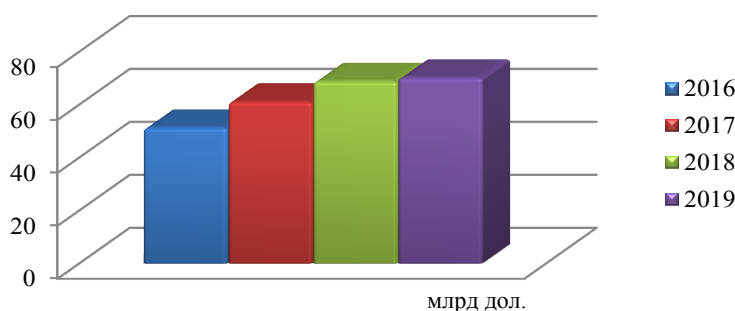


Рис. 1. Динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации

Fig. 1. Dynamics of growth of funds invested in the counteracting the effects of corrosion of metals in the Russian Federation

Общие потери от коррозии принято разделять на прямые и косвенные. Прямые – потери металла, связанные с его превращением в ржавчину. Косвенные связывают с отказом в работе металлического оборудования, его простоем, ремонтом и т. д. Прямые потери составляют ~1 %, косвенные – 25 % от всего объема ежегодно производимого металла [4].

Ежегодно материальный ущерб от коррозии металла оборудования возрастает. Уже сегодня многие страны столкнулись с проблемой превышения темпов роста потерь от коррозии над темпами роста металлофонда.

Проблема защиты конструкционных материалов от коррозии является актуальной и для Республики Беларусь в связи с вводом в эксплуатацию первого энергоблока Белорусской АЭС в 2020 г. [5]. Стоит отметить, что интерес к данному вопросу будет ежегодно возрастать с увеличением времени наработки и необходимостью обоснования продления ресурса работы уже действующих энергоблоков. От решения данной проблемы в значительной степени будет зависеть безопасность и надежность эксплуатации БелАЭС.

Основная часть

Развитие ядерной энергетики поставило задачу разработки специальных конструкционных материалов. Специфика требований, предъявляемых к ним, заключается в том, что они должны поглощать как можно меньше

нейтронов. В табл. 1 представлены значения сечений поглощения тепловых нейтронов для различных элементов, служащих в качестве конструкционных для активной зоны ядерного реактора.

Таблица 1

**Сечения поглощения тепловых нейтронов
для реакторных конструкционных материалов [6]**
Thermal neutron absorption cross sections for reactor structural materials [6]

Элемент	Сечение поглощения, барн	Температура плавления, °С
Be	0,010	1280
Mg	0,063	651
Zr	0,180	1845
Al	0,230	660
Ni	1,100	2415
Fe	2,530	1539
Mo	2,500	2625
Cu	3,690	1083
Ni	4,600	1455
Tl	5,800	1725

Из табл. 1 видно, что наиболее полно этому требованию отвечают следующие элементы: бериллий, магний, алюминий и цирконий. Наиболее удачным сочетанием ядерных и физических свойств из этих четырех металлов обладает цирконий, являющийся сегодня основным конструкционным материалом для оболочки твэлов.

Стремление к повышению механических свойств циркония привело к необходимости разработки его композитов. При этом выбор легирующих элементов и их процентное содержание определяется рядом факторов таких как:

- 1) незаметное увеличение значения сечения поглощения тепловых нейтронов;
- 2) отсутствие в сплаве элементов, которые после облучения дают долгоживущие дочерние нуклиды;
- 3) стабилизация коррозионной стойкости сплава и понижение склонности композита к поглощению водорода;
- 4) повышение механических свойств композита;
- 5) сохранение технологических свойств чистого циркония.

В качестве легирующего элемента для оболочки твэлов легководных реакторов используют ниобий. С точки зрения экономии тепловых нейтронов, ниобий является наиболее перспективным легирующим элементом, который повышает не только прочностные характеристики композитов, но и их коррозионную стойкость в теплоносителе. Установлено, что процентное содержание ниобия, которое нужно вводить в сплав для повышения коррозионной стойкости, зависит от температуры [6].

За рубежом в качестве легирующего элемента для оболочки твэлов используют олово. Сегодня эти сплавы известны как циркалои: Zr-2, Zr-4. Специальной разработкой, способствующей снижению скорости коррозии, также являются ZIRLO™ и M5®.

Для БелАЭС в качестве конструкционных материалов твэлов использованы циркониевые сплавы Э110 (отожжен при температуре 580 °С) и Э635. В табл. 2, 3 представлен состав вышеуказанных сплавов [7], а в табл. 4 – их механические свойства.

Таблица 2

Состав сплава Э635 (% от веса) [10]**The composition of the alloy E635 (% by weight) [10]**

Элемент	Nb	Sn	Fe	O	Si	Zr
min, %	0,90	1,10	0,30	0,05	0,0050	–
max, %	1,10	1,40	0,47	0,12	0,0200	Остальное

Таблица 3

Состав сплава Э110 (% от веса) [10]**The composition of the alloy E110 (% by weight) [10]**

Элемент	Nb	Zr
min, %	0,90	–
max, %	1,10	Остальное

Таблица 4

Механические свойства сплавов [10]**Mechanical properties of alloys [10]**

Сплав	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
Э110	370	340	32
Э635	650	580	21

Коррозионные процессы в активной зоне ядерного реактора неизбежны со стороны как топлива, так и теплоносителя. Ключевыми вопросами данного процесса являются скорость его протекания и глубина поражения. При повышенных температурах в условиях интенсивного внешнего облучения любой теплоноситель вне зависимости от типа ядерного реактора (вода, жидкий металл и др.) при контакте с твэлами, каналами для циркуляции теплоносителя, системами трубопроводов и корпусами реакторов является в той или иной степени агрессивным. В реальных условиях эксплуатации циркониевых сплавов в качестве оболочек твэлов появляются дополнительные факторы, которые вносят существенный вклад в коррозионный процесс. К ним относятся: специфический химический состав и агрегатное состояние теплоносителя в реакторах, тепловые нагрузки твэлов, нейтронное облучение, отложения продуктов коррозии контура на поверхности оболочки, вибрация твэлов. На коррозию циркония также влияют

компоненты теплоносителя, вводимые для регулирования водно-химического режима, и химические элементы и соединения, образующиеся в теплоносителе в результате протекания химических процессов и радиолиза.

Большое влияние на коррозию циркониевых сплавов оказывает наличие урана в теплоносителе. При этом наиболее подвержены коррозионному процессу в присутствии урана травленные поверхности. Борная кислота, которая дозируется в теплоноситель реактора ВВЭР-1200, не сильно влияет на коррозию циркониевых сплавов. На скорость коррозионного процесса (в частности, на асимметричный профиль оксидной пленки) заметное влияние оказывает распределение нейтронного потока в активной зоне реактора, что сказывается уже при плотности нейтронного потока около 10^{14} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ($E > 1$ МэВ). Присутствие кислорода при облучении вызывает усиление коррозии циркониевых сплавов, которое становится заметным при содержании кислорода в воде ~ 1 млн⁻¹ и флюенсе нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ нейтр./ см^2 . Добавление водорода к воде под давлением подавляет образование радиолитического кислорода, в результате чего скорость коррозии сплавов при облучении не увеличивается или увеличивается незначительно. Важным фактором, оказывающим большое влияние на коррозию циркониевых сплавов Э110 и Э635, является наличие фазового превращения в цирконии (при температуре 862 °С). Поэтому для этих циркониевых сплавов характерно весьма существенное влияние структурного состояния металла на коррозионные и механические свойства изделий. Стоит отметить, что на коррозионное поведение циркониевых сплавов также влияет длительное хранение на воздухе оболочек твэлов (или готовых твэлов) без предварительной специальной обработки. Поэтому оболочки перед поступлением их на сборку твэлов подвергают химическому травлению в смеси азотной и плавиковой кислот и промывке, а готовые твэлы – автоклавированию в дистиллированной воде при температуре 300 °С в течение 72 ч.

Итогом взаимодействия циркониевого сплава и теплоносителя (воды) при высоких температурах является окисление и наводороживание. Процесс окисления циркониевых сплавов в воде и паре достаточно сложен. Кинетика реакции окисления описывается наличием двух периодов. Первый характеризуется образованием плотно прилегающей защитной нестехиометрической окисной пленки двуокиси циркония, окрашенной в цвета побежалости, переходящими в черный цвет. В этом случае процесс коррозии носит электрохимический характер. С ростом толщины пленки процесс замедляется и со временем стабилизируется. Образование оксидной пленки не зависит от положения тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне, выгорания или года эксплуатации [8]. Одновременно с образованием окисной пленки происходит ее растворение и насыщение металла кислородом. Атомы кислорода размещаются в октаэдрических пустотах $K_V r_1 = 0,66 \text{ \AA}$. На каждый атом циркония в гексагональной плотноупакованной кристаллической решетке приходится одна октаэдрическая пустота. Следующие порции кислорода размещаются в тетраэдрических пустотах $r_1 = 0,36 \text{ \AA}$ [9].

Через некоторое время наступает второй период, характеризующийся резким повышением скорости коррозии. При этом оболочка покрывается белым, светло-серым, рыхлым, легко осыпавшимся окислом. На сплавах циркония образование белой осыпающейся двуокиси циркония наблюдается при достижении привеса 30–50 мг/дм² [10]. В соответствии с [11], оксидная пленка приобретает белый цвет поверхности начиная с толщины $\sim(7-8)$ мкм. Стоит отметить, что белая пленка образуется поверх черной и по причине того, что она слабо связана с подложкой, переходит в теплоноситель.

Металлографические исследования показали, что максимальная толщина образовавшегося оксида по длине твэла не изменяется, но с увеличением высотной координаты нарастает процесс расслоения оксидной пленки. При этом степень отслоения оксида с поверхности разных твэлов различна. Одной из возможных причин разного отслоения оксида может быть отличие в вибрации твэлов в потоке теплоносителя вследствие различной жесткости их закрепления в ячейках дистанционирующих решеток.

Установившийся процесс коррозии на первом и втором этапах описывается следующим уравнением [12]:

$$\Delta m = kt^n, \quad (1)$$

в логарифмических координатах [12]

$$\lg \Delta m = kn \lg t, \quad (2)$$

где Δm – привес за счет образования окисной пленки за время t со скоростью окисления n .

Значение коэффициента k соответствует толщине оксидной пленки. Для сплава Zr с 1 % Nb при испытании в воде температурой 350 °C коэффициент k составляет 0,2. Стоит отметить, что с повышением температуры значение k только увеличивается. После образования минимально необходимой толщины пленки процесс стабилизируется.

Для циркониевых сплавов Э110 и Э635 характерна как местная, так и общая (равномерная) коррозия, влияние которой по сравнению с локальной незначительно. Более высокий уровень равномерной коррозии характерен для оболочек из сплава Э635 по причине многокомпонентности состава.

Циркониевые оболочки твэлов подвержены следующим видам местной коррозии: сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия. Циркониевые сплавы не склонны к щелевой межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением.

Образование рыхлой окисной пленки на втором этапе окисления оболочки приводит к быстрой сквозной коррозии и, как следствие, к разрушению оболочки твэла и загрязнению теплоносителя реактора продуктами окисления с последующей их активацией.

Наряду с возникновением сквозной коррозии на оболочке твэлов возникает также коррозия пятнами, что связано с местными напряжениями

при механическом взаимодействии с топливом. Диаметр пятен 0,2–0,5 мкм, толщина 10–100 мкм и более. Коррозия пятнами приводит к нарушению целостности окисной пленки, ослаблению ее защитных свойств, различного рода технологическим дефектам, превышению допустимого теплового потока через поверхность оболочки.

В результате объемного увеличения оксида циркония, радиолитического теплоносителя и радиационного повреждения материала оболочки возникает питтинговая (точечная) коррозия. Центрами образования питтингов служат присутствующие в металле интерметаллиды. Точечная коррозия усиливается в местах контакта твэлов с дистанционирующими решетками.

При эксплуатации топливных сборок могут происходить некоторые деформационные процессы в местах крепления, прежде всего в дистанционирующих решетках. Под воздействием потока теплоносителя происходит вибрация твэлов, в результате чего реализуется фреттинг-коррозия. Частота колебаний должна быть такой, чтобы за период вибрации окисная пленка не могла достичь сколько-нибудь заметной толщины: разрушить адсорбционный слой или монослой окисла легче, чем фазовую окисную пленку. За такую толщину принимают 10^{-7} см (толщину двух монослоев окисла). В соответствии с [12] наиболее опасными, с точки зрения коррозии, при трении являются частоты 10 Гц и более.

Опыт эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов показал, что водород, который накапливается в циркониевых элементах конструкции при эксплуатации энергоблока, по достижении предельной (критической) концентрации является одним из основных критериев предельного состояния твэлов реактора. Опасность усугубляется и тем, что присутствие водорода может пагубно отразиться на состоянии циркониевых комплектующих ТВС при длительном хранении отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и обращении с ним.

Степень негативного влияния водорода на свойства циркониевых сплавов определяется его количеством и распределением, равномерностью и ориентацией выделившихся гидридов, состоянием оксидной пленки.

К основным деградирующим явлениям с участием водорода относятся: водородное охрупчивание (резкое уменьшение пластичности при гидрировании), образование крупных массивных гидридов (дефект типа «солнечная корона»), гидридное растрескивание (обусловлено одновременным воздействием напряжения и водорода на оболочку твэла – “Split effect”).

Стоит отметить, что точный механизм водородного охрупчивания сегодня неизвестен. Одним из объяснений служит рекомбинация атомарного водорода в молекулярный на дислокациях и нанопорах с сопровождающим этот процесс резким возрастанием давления и последующим зарождением трещин в металле. Так на твэле № 79 (ТВСАPLUS № ЖД02585), извлеченном из реактора ВВЭР-1000, наблюдался разрыв на участке, расположенном в пролете между ДР12 и ДР13. Оболочка на участке, прилегающем к месту разрушения, была сильно наводорожена и охрупчена.

ВЫВОДЫ

1. Коррозионные процессы в активной зоне ядерного реактора неизбежны со стороны как топлива, так и теплоносителя.

2. Легирование циркония с целью повышения его механических свойств производится с учетом ряда факторов, таких как: незаметное увеличение значения сечения поглощения тепловых нейтронов; отсутствие в композите элементов, которые после облучения дают долгоживущие дочерние нуклиды; стабилизация коррозионной стойкости сплава и понижение склонности композита к поглощению водорода; повышение механических свойств сплава; сохранение технологических свойств чистого циркония.

3. С точки зрения экономии тепловых нейтронов, наиболее перспективным легирующим элементом является ниобий, который повышает не только прочностные характеристики композитов, но и их коррозионную стойкость.

4. Итогом взаимодействия циркониевого сплава и теплоносителя (вода) при высоких температурах является окисление и наводороживание.

5. Для циркониевых сплавов Э110 и Э635 характерна как местная, так и общая (равномерная) коррозия. При этом влияние последней менее значительно.

6. Более высокий уровень равномерной коррозии характерен для оболочек из сплава Э635.

7. Для циркониевых оболочек твэлов характерны следующие виды местной коррозии: сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия.

8. Для обеспечения радиационной безопасности энергоблоков и снижения негативных последствий разгерметизации твэлов необходимо проводить контроль герметичности оболочек твэлов во время работы реактора.

9. На сегодняшний день разработано большое количество сплавов для оболочек твэлов: Э110, Э635, Zr-2, Zr-4, ZIRLO™, M5®. Однако каждый из них в той или иной мере подвержен коррозии, что требует дальнейших исследований в этом направлении и разработки новых альтернативных сплавов с целью снижения скорости коррозии и, как следствие, обеспечения надежности и безопасности эксплуатации до высоких выгораний топлива, увеличения их компании в реакторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами / А. А. Ищенко [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 159–166. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166>.
2. Чиж, В. А. Водоподготовка и водно-химические режимы электростанций / В. А. Чиж, Н. Б. Карницкий. Минск: БНТУ, 2004. 99 с.
3. Рейтинг экономик мира 2019, таблица ВВП стран мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://basetop.ru/rejting-ekonomik-mira-2019-tablitsa-vvp-stran-mira/>. Дата доступа: 21.02.2019.
4. Минск подтверждает сроки ввода в эксплуатацию БелАЭС [Электронный ресурс] // Интерфакс. Режим доступа: <https://www.interfax.by/news/belarus/1241924>. Дата доступа: 10.03.2019.
5. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. 2-е изд., стер. М.: Альянс, 2006. 472 с.

6. Шлугер, М. А. Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
7. Парфёнов, Б. Г. Коррозия циркония и его сплавов / Б. Г. Парфёнов, В. В. Герасимов, Г. И. Венедиктова. М.: Атомиздат, 1967. 257 с.
8. Лустман, Б. Металлургия циркония: пер. с англ. / Б. Лустман. М.: Изд-во иностр. лит. 1959. 160 с.
9. Ivanov O. S. Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of the United Nations / O. S. Ivanov. 1958. Vol. 5, Geneva, (Paper No 2046).
10. Чепецкий металлический завод [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chmz.net/product/zr/slitki/>. Дата доступа: 10.03.2019.
11. Результаты исследования структуры оксидной пленки на участках повышенного окисления оболочек твэлов ТВС-2М, отработавшей на 4-м энергоблоке Балаковской АЭС в течение одной топливной кампании / И. Н. Волкова [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: материалы 11-й Международ. науч.-техн. конф., Москва, 23–24 мая 2018 г. / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2018. С. 35–39.
12. Герасимов, В. В. Коррозия реакторных материалов / В. В. Герасимов. М.: Атомиздат, 1980. 256 с.

Поступила 17.05.2019 Подписана в печать 12.09.2019 Опубликовано онлайн 31.01.2020

REFERENCES

1. Ischenko A. O., Kravchenko V. M., Dashko O. V., Kakareka D. V. (2017) New Technologies for Restoration and Protection of Power Equipment with the Aid of Composite Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 159–166. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166> (in Russian).
2. Chizh V. A., Karnitskii N. B. (2004) *Water Treatment and Water-Chemical Regimes of Power Plants*. Minsk, Belarusian National Technical University, 99 (in Russian).
3. *Rating of World Economies in 2019, the Table of GDP of Countries of the World*. Available at: <https://basetop.ru/rejting-ekonomik-mira-2019-tablitsa-vvp-stran-mira/>. (Accessed 21 February 2019) (in Russian).
4. Minsk Confirms the Commissioning Date of BelAES (2018) *Interfax*. Available at: <https://www.interfax.by/news/belarus/1241924>. (Accessed 3 October 2019) (in Russian).
5. Zhuk N. P. (2006) *The Course of the Theory of Corrosion and Protection of Metals: a Manual for Metallurgical Specialties of Universities*. 2nd ed. Moscow, Alliance Publ. 472 (in Russian).
6. Shluger M. A., Azhogin F. F., Efimov E. A. (1981) *Corrosion and Protection of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ. 216 (in Russian).
7. Parfenov B. G., Gerasimov V. V., Venediktova G. I. (1967) *Corrosion of Zirconium and its Alloys*. Moscow, Atomizdat Publ. 257 (in Russian).
8. Lustman B., Kerze F. (1955) *The Metallurgy of Zirconium*. 4th ed. New York, McGraw-Hill? 776.
9. Ivanov O. S. (1958) Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of the United Nations. 5, Geneva (Paper No 2046) (in Russian).
10. *Chepetsky Metal Plant*. Available at: <http://www.chmz.net/product/zr/slitki/>. (Accessed 3 October 2019) (in Russian).
11. Volkova I. N., Goryachev A. V., Zvir E. A., Zhitelev V. A., Nikitin O. N., Strozhuik A. V. (2018) The Results of the Study of the Structure of the Oxide Film in the Areas of Increased Oxidation of the Fuel Cell Cladding of the TVS-2M Fuel Rods, which Was Used at the 4th Power Unit of Balakovo NPP During One Fuel Campaign. *Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoi Energetiki: Materialy 11-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Moskva, 23–24 Maya 2018 g.* [11 International Scientific and Technical Conference “Safety, Efficiency and Economics of Atomic Energy” Plenary and Sectional Reports, Moscow, May 23–24], 35–39 (in Russian).
12. Gerasimov V. V. (1980) *Corrosion of Reactor Materials*. Moscow, Atomizdat Publ. 256 (in Russian).

Received: 17 May 2019

Accepted: 12 September 2019

Published online: 31 January 2020